



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje



# ZAVRŠNI RAD

**Slaven Prajdić**

Zagreb, 2014.



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje



**ODREĐIVANJE PROTOČNE KOLIČINE  
ROTAMETROM  
ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, dipl. ing.

Student:

Slaven Prajdić

Zagreb, 2014.

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno uz pomoć dopuštenih i dostupnih materijala i znanja stečenog na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Slaven Prajdić

## SADRŽAJ

IZJAVA .....	3
POPIS SLIKA .....	6
POPIS TABLICA .....	7
POPIS OZNAKA .....	8
SAŽETAK .....	9
SUMMARY .....	10
1. UVOD .....	11
2. MJERENJE PROTOKA .....	12
2.1. MJERENJE INTEGRACIJOM POLJA BRZINE PREKO POVRŠINE .....	12
STRUJNOG PRESJEKA .....	12
2.2. GRAVIMETRIJSKA I VOLUMETRIJSKA METODA MJERENJA .....	13
2.3. HIDROMETRIJSKI OTVORI I SAPNICE .....	14
2.3.1. PRIGUŠNICE ( BLENDE ) .....	14
2.3.2. SAPNICE .....	15
2.3.3. VENTURIMETRI .....	16
2.4. UVOĐENJE HIDRODINAMIČKIH OTPORA U SISTEM .....	17
2.4.1. ROTAMETRI (MJERAČI S LEBDEĆIM TIJELOM) .....	17
2.4.2. MJERAČI S PLOČICOM U STRUJI FLUIDA .....	17
2.4.3. MJERAČI S PARALELNIM OTPORIMA .....	18
2.4.4. MJERAČI U OBLIKU CIJEVNOG KOLJENA .....	18
2.4.5. MJERAČI S OKRETNOM ZAKLOPKOM .....	18
2.5. VOLUMETRIČKI BROJAČI .....	19
2.5.1. MJERAČI SA STALNIM VOLUMENOM MJERNE KOMORE .....	19
2.5.2. MJERAČI (BROJILA) S PERIODIČNO PROMJENLJIVIM VOLUMENOM MJERNE KOMORE .....	20
2.5.3. MJERAČI S MJERNIM KRILCIMA .....	22
2.6. MJERAČI NA PRINCIPU ELEKTROMAGNETSKOG EFEKTA .....	23
2.7. PRELJEVI I KANALI PROMJENLJIVOG PRESJEKA .....	23
2.7.1. PRELJEVI .....	24
2.7.2. KANALI PROMJENLJIVA PRESJEKA .....	24
2.8. MJERAČI NA PRINCIPU POSEBNIH EFEKATA .....	25
2.8.1. PULZIRAJUĆI VRTLOZI .....	25

2.8.2. ULTRAZVUČNA METODA .....	25
3. ROTAMETRI (MJERAČI S LEBDEĆIM TIJELOM).....	26
3.1. MJERENJE ROTAMETROM .....	27
3.2. GRAĐA ROTAMETRA .....	30
3.3. PREGLED KARAKTERISTIKA .....	32
3.4. VRSTE ROTAMETARA.....	32
3.4.1. STAKLENI ROTAMETRI .....	32
3.4.2. METALNI ROTAMETRI.....	33
3.4.3. PLASTIČNI ROTAMETRI .....	33
4. UMJERAVANJE ROTAMETRA.....	34
4.1. VOLUMETRIČKA METODA .....	34
4.2. GRAVIMETRIJSKA METODA .....	37
4.3. USPOREDNA METODA .....	39
4.4. KINEMATIČKA SIMULACIJA .....	40
4.5. PROVJERA.....	40
5. REZULTATI MJERENJA PROTOČNE KOLIČINE FLUIDA.....	43
6. ZAKLJUČAK .....	51
7. LITERATURA.....	52

## **POPIS SLIKA**

Slika 2.1. - Prigušnica (blenda)

Slika 2.2. - Shema klasičnog venturimetra

Slika.3.1. - Princip mjerenja rotametrom

Slika 3.2. - Građa rotametra

Slika 4.1. - Mjerna linija volumetričke metode

Slika 4.2. - Mjerna linija volumetričke metode (plin kao fluid)

Slika 4.3. - Mjerna linija gravimetrijske metode

Slika 4.3. - Mjerna linija gravimetrijske metode

Slika 4.4. - Mjerna linija usporedne metode

Slika 4.5.- Prikaz mjerne linije prilikom pokusa (1)

Slika 4.6. - Prikaz mjerne linije prilikom pokusa (2)

Slika 5.1. - Mjerna linija u laboratoriju

Slika 5.2. - Utjecaj gustoće fluida i površine poprečnog presjeka na protok (Kisik)

Slika 5.3. - Utjecaj gustoće fluida i površine poprečnog presjeka na protok (Argon)

Slika 5.4. - Utjecaj gustoće fluida i površine poprečnog presjeka na protok (Dušik)

Slika 5.5. - Utjecaj gustoće fluida i površine poprečnog presjeka na protok (Ugljikov dioksid)

## **POPIS TABLICA**

Tablica 5.1. - Podaci sa certifikata pojedinog rotametra

Tablica 5.2. - Podaci o rotametri 1

Tablica 5.3. - Podaci o rotametri 2

Tablica 5.4. - Rezultati mjerenja s različitim fluidima

Tablica 5.5. - Gustoća pojedinog fluida

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$w_i$	[m/s]	- lokalna brzina
$A$	[m <sup>2</sup> ]	- površina strujnog presjeka
$B$	[m]	- širina kanala
$h$	[m]	- visina kanala
$\rho_t$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- gustoća tekućine
$\rho_R$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- gustoća ronila
$V_R$	[m <sup>3</sup> ]	- volumen ronila
$S_R$	[m <sup>2</sup> ]	- površina ronila
$v$	[m/s]	- srednja brzina tekućine
$f_T$	[-]	- faktor trenja
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	- ubrzanje sile teže
$A_P$	[m <sup>2</sup> ]	- maksimalni presjek plovka
$A_{CY}$	[m]	- presjek cijevi na visini y
$Q_m$	[m <sup>3</sup> /min]	- volumni protok tekućine mjerene u jedinici po minuti
$\rho_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- gustoća plovka
$V_C$	[m <sup>3</sup> ]	- volumen mjerene tekućine
$W_m$	[kg/min]	- maseni protok
$W_c$	[kg]	- težina umjeravanog fluida
$U_v$	[-]	- mjerna nesigurnost



## **SAŽETAK**

Rotametri su uređaji za direktno mjerenje protočne količine fluida. Zadatak ovoga rada je razrada određivanja protočne količine rotametrom za potrebe kontrolnih mjerenje i/ili ispitivanja mjerila protoka. Korištena je postojeća oprema u umjernom laboratoriju za tlak BMB-Brcković.

U radu je sistematiziran pregled metoda mjerenja protoka, principi i mjerenje rotametrom. Mjerenja izvršena u umjernom laboratoriju su imala poseban naglasak na mogućnost korištenja različitih fluida. Korišteni su različiti fluidi (argon, kisik, dušik, ugljikov dioksid), koji su se na različitim narinutim nazivnim protokom puštali kroz dva umjeravana rotametra. Opisan je postupak mjerenja u laboratoriju, a rezultati su prikazani u tablicama i dijagramima.

Ključne riječi: protočna količina, rotametar, umjeravanje rotametara

## **SUMMARY**

Rotameters are devices for measuring flow rate of fluids. The main task of this paper is an elaboration of determining the flow rate with rotameters for control or testing purposes of flow rate measuring devices. Existing equipment in the calibration laboratory for pressure BMB Brcković was used. Systematic review of the methods of flow measurement, and measurements with rotameters are given in this paper. Measurements made in the calibration laboratory had a special emphasis on the use of different fluids. Different fluids were used (argon, oxygen, nitrogen, carbon dioxide), which were passed through two calibrated rotameters on different applied nominal flow rate. The procedure of measurement in the laboratory, and the results are presented in tables and diagrams.

Keywords: flow rate, rotameter, calibration of rotameters

## 1. UVOD

U ovom radu bit će govora o metodama mjerenja protoka. Sistematizirat će se različite metode s posebnim naglaskom na metodu mjerenja rotametrom koji je i glavna tema ovoga rada. Teoretski će se obraditi princip rada i mjerenja rotametrom, uz upotrebu različitih fluida, sa različitom aparaturom. Rotametar je najčešće upotrebljavani uređaj za mjerenje protoka u laboratoriju, a često se koristi i u procesnoj industriji. Velika zastupljenost rotametra je posljedica jednostavnosti uređaja, široke primjenljivosti s obzirom na mogućnost mjerenja protoka plinova i kapljevina i vrlo veliki mjerni opseg. Mjerenje rotametrom se također zasniva na povezanosti pada tlaka koji nastaje protjecanjem kroz suženje i protoka tekućine. Razlikujemo različite vrste rotametara: staklene, metalne, plastične. Također će se pokazati teoretski postupak mjerenja i umjeravanja rotametara. Bit će razrađen i postupak umjeravanja u laboratoriju. Na kraju će sva mjerenja i rezultati biti sistematizirani i pokazani u tablicama i dijagramima. Mjerenja su provedena u vrhunskom laboratoriju koji se specijalizirao za servis, ispitivanje, ovjeravanje i umjeravanje svih vrsta mjerila tlaka i temperature. Ovlašteni od Državnog zavoda za mjeriteljstvo – kao ovlašteni servis (oznake 606) i Hrvatskog registra brodova.

## 2. MJERENJE PROTOKA

Protok je jedna od osnovnih fizikalnih veličina koja se mjeri u industrijskom pogonu. Mjerenjem protoka određuju se energetske i materijalne bilance na osnovu kojih se određuje produktivnost procesa proizvodnje. Istovremeno protok je najčešće i osnovna veličina čjom se promjenom upravlja procesom proizvodnje. Mjerenje protoka kapljevina, plinova, višefaznih tekućina i suspenzija je složeno, podložno je brojnim pogreškama, i zato je razvijen veliki broj različitih mjernih postupaka u svrhu preciznog i pouzdanog mjerenja.

### 2.1. MJERENJE INTEGRACIJOM POLJA BRZINE PREKO POVRŠINE STRUJNOG PRESJEKA

Mjerenjem brzine u točki ( točnije u manjoj površini ) presjeka strujanja omogućava se snimanje diskretnog broja i brzina po presjeku, odnosno umnoškom lokalne brzine i pripadajućeg presjeka i diskretan niz protoka preko cijele površine strujanja. Integracijom ( zbrajanjem ) ovih lokalnih protoka dobiva se protok kroz cijeli presjek strujanja. Prilikom integracije ( zbrajanja ) može se pristupiti određivanju protoka s pomoću srednje brzine ili sumiranjem lokalnih protoka.

$$w_{sr} = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} w_i$$

slijedi protok:  $Q = w_{sr}A$

$nm$  – broj lokalnih presjeka u kojima je izmjerena brzina

$w_i$  - lokalne brzine

$A$  – ukupna površina strujnog presjeka

$$Q = \sum_{i=1}^{nm} w_i A_i$$

$A_i$  - lokalni strujni presjek

$$\sum_{i=1}^{nm} A_i = A$$

Kod nepravilnih površina ili nehomogena profila brzina mogu se, primjenom ovih dvaju metoda na isti slučaj, pojaviti znatnije razlike. U takvim slučajima rješenja treba potražiti u odgovarajućoj literaturi ili standardima. Da bi se izbjegle dvojbe iz prakse, standardi određuju metodiku mjerenja točnim definiranjem točaka preko strujnog presjeka, tako da se s pomoću srednje brzine dobivaju pouzdane vrijednosti. Posebni problemi se pojavljuju kod nesimetričnih profila brzina ( neizobraženo strujanje ) i brzina s vrtložnom komponentom. U takvim se slučajevima predlaže dosljedno primjena standarda.

## 2.2. GRAVIMETRIJSKA I VOLUMETRIJSKA METODA MJERENJA

Gravimetrijska metoda određivanja protoka osniva se na određivanju mase kapljevine ( vaganje ) i vremena potrebnog da protekne ta masa. Ova je metoda primjenjiva isključivo na kapljevine.

Volumetrijska metoda počiva na mjerenju trajanja vremena da se fluidom ispuni određeni prostor ( kalibrirani volumen ).

Mana je prve metode u tome da se razina u jednom spremniku spušta, a u drugome raste. To može uzrokovati promjene protoka ( radna točka pumpe ) u tijeku procesa mjerenja. U takvim se slučajevima može primijeniti princip „spremnik u spremnik“, kod kojeg je izbjegnuta navedena pojava. Ova se metoda može primijeniti i za mjerenje protočnih količina ( volumenskih ) plinova. Zbog složenosti instalacije, te vremena potrebnog za pouzdano određivanje protoka ( reda veličine 90 sekundi ), opisane metode nisu praktične za izravnu tehničku primjenu. No zbog izuzetno visoke točnosti mjerenja, one se primjenjuju za kalibraciju drugih tipova protokomjera. Može se za njih reći da su tipiče kalibracijske metode za kalibraciju svih drugih tipova protokomjera.

## 2.3. HIDROMETRIJSKI OTVORI I SAPNICE

Postoji velika skupina klasičnih hidrodinamičkih instrumenata kod kojih je protok razmjeran razlici tlaka na osnovnom mjerачu. Mjerач je uređaj kod kojeg se zbog promjene strujnog presjeka pojavljuje razlika statičkih tlakova, koja je razmjerna veličini protoka. Načelno se ovi mjerачi mogu podijeliti na:

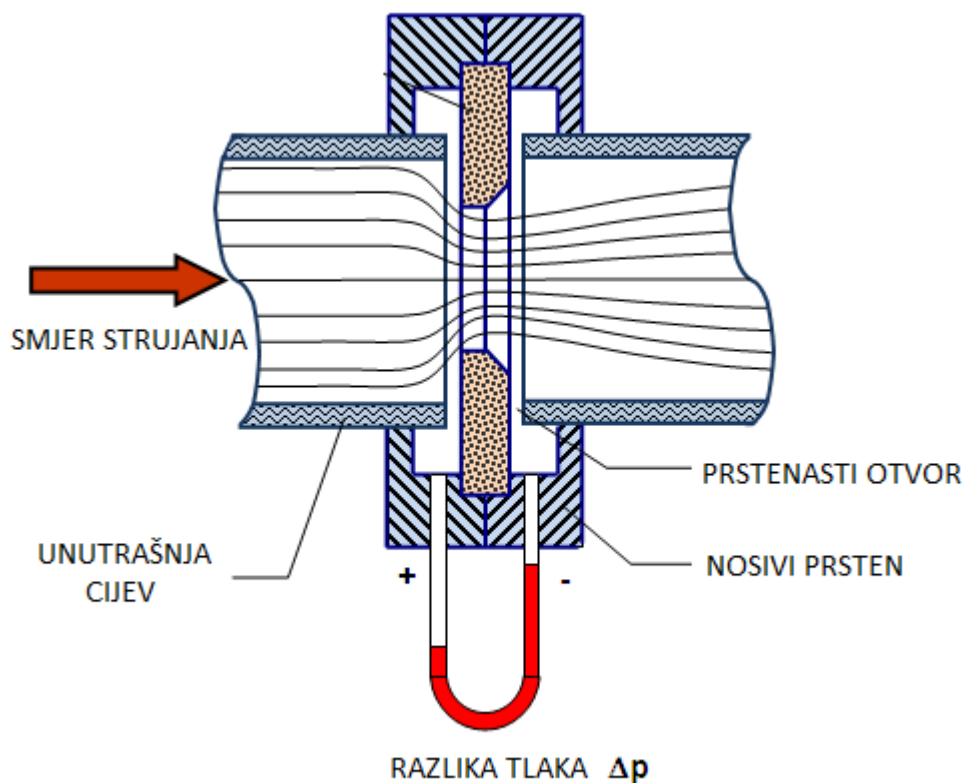
*a) PRIGUŠNICE ( BLENDE )*

*b) SAPNICE*

*c) VENTURIMETRI*

### 2.3.1. PRIGUŠNICE ( BLENDE )

Hidrodinamički gledano, prigušnice su najjednostavniji mjerачi protoka. Postoje različiti načini ugradnje prigušne ploče u cjevovod. Unatoč svojoj jednostavnosti ovaj se mjerач protoka ne može preporučiti jer u sistemu inducira velike hidrodinamičke gubitke, odnosno stvara velike režijske troškove ako se rabi u trajnom pogonu. Segmentna se prigušnica nalazi danas rijetko u primjeni, iako, s hidrodinamičkog stanovišta, ima bolja svojstva, to jest inducira manje otpore od klasične prigušnice. Princip rada omogućava takvu konstrukciju kućišta koja omogućava izvlačenje segmentne prigušnice iz aktivne struje fluida. Time se mogu ostvariti znatne uštede jer ova prigušnica ne inducira stalne gubitke.



Slika 2.1. Prigušnica (blenda)

### 2.3.2. SAPNICE

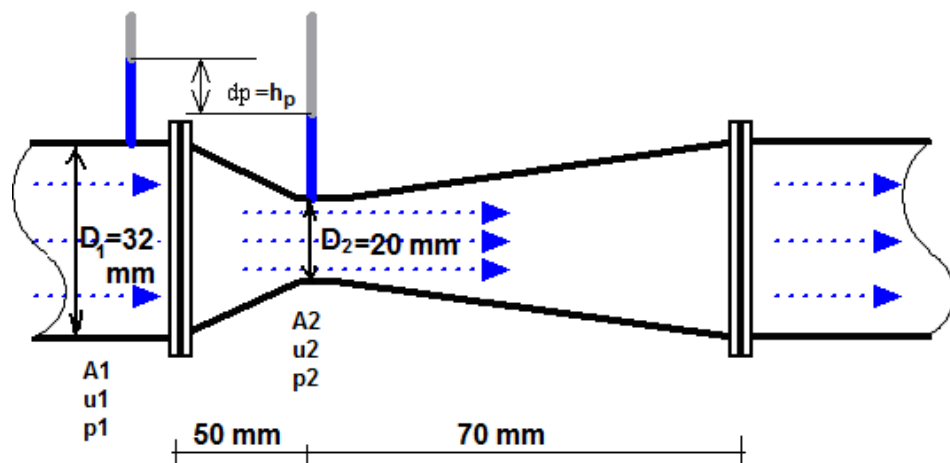
Ovi su mjerači protoka hidrodinamički povoljnije profilirani, tako da se, uz isti pad tlaka na mjerачu, kod ovih uređaja hidrodinamički gubitak osjetno smanjuje (i do 50%) u usporedbi s prigušnicama. Postoje sapnice s raspornom komorom tlaka ili s kutnim oduzimanjem tlaka uz ploču. Ovakvim sistemima oduzimanja tlaka omogućena je lakša ugradnja mjerачa sa sapnicom u cjevovod. Osim navedene, primjenjuje se i eliptična sapnica (long-radius nozzle).

### 2.3.3. VENTURIMETRI

Razlikuju se:

#### 1) KLASIČNI VENTURIMETAR

Zbog svoje geometrije zahtijeva relativno veći prostor, a zbog rubnih mjernih hidrodinamičkih uvjeta zahtijeva i vrlo dugu ravnu dionicu cjevovoda (izobraženo strujanje) prije i poslije mjerača. Zbog navedenog ti mjerači postižu vrlo visoku točnost ( $<\pm 0,5\%$ ), tako da se najčešće susreću kalibracijski mjerači kod kalibracije drugih mjerača.



Slika 2.2. Shema klasičnog venturimetra

#### 2) VENTURISAPNICA

Koristi se i za manje i za veće omjere. Tlak prije mjerača može se također oduzimati preko rasporne komore i kutnim oduzimanjem tlaka uz čeonu pihu mjerača.



## 2.4. UVOĐENJE HIDRODINAMIČKIH OTPORA U SISTEM

Ugradnjom nekog hidrodinamičkog otpora u cjevovodni sistem uzrokuje se razlika statičkih tlakova prije i poslije mjerača, koja je razmjerna protoku kroz sistem. Načelno to mogu biti svi uobičajeni lokalni hidrodinamički otpori ili neki dodatni. Tako se po, vrsti otpora, razlikuju ovi mjerači:

- a) ROTAMETRI ( MJERAČI S LEBDEĆIM TIJELOM)
- b) MJERAČI S PLOČICOM U STRUJI FLUIDA
- c) MJERAČI S PARALELNIM OTPORIMA
- d) MJERAČI U OBLIKU CIJEVNOG KOLJENA
- e) MJERAČI S OKRETNOM ZAKLOPKOM

### 2.4.1. ROTAMETRI (MJERAČI S LEBDEĆIM TIJELOM)

Ti mjerači nalaze primjenu u procesnoj i prehrambenoj industriji s prozirnim ( no ne mora biti uvjet ) fluidima. Mjerna se pouzdanost kreće u granicama  $\pm 2\%$ . U staklenoj koničnoj cijevi, na koju je ugravirana i skala, nalazi se hidrodinamički formiran čep (lebdeće tijelo) koje se podiže zbog povećanja hidrodinamičkog otpora. Podizaj  $h$  je proporcionalan protoku, a profiliranjem konusa staklene cijevi ( kut  $\beta$  ) može se postići i linearnost mjerača ( za određeni fluid, određena stanja ). Za industrijske svrhe izrađuju se robusniji mjerači. Cijevi su uglavnom izrađene od stakla ( providni fluid ), a moguće su izvedbe i od kovine ( veći tlakovi ili neprovidni fluidi ) kod kojih se podizaj čepa registrira električnim putem.

### 2.4.2. MJERAČI S PLOČICOM U STRUJI FLUIDA

U struji fluida kroz cijev se može uvesti pločica., koja svojim otporom uzrokuje pojavu aktivne sile na nju. Ta sila je razmjerna protoku. Mjerna se pouzdanost tih mjerača kreće u granicama  $\pm 3\%$ . Mjerač se malokada primjenjuje u praksi jer je osjetljiv na onečišćene fluide, a uzrokuje i relativno velike gubitke, što ga čini nerentabilnim za primjenu u praksi.

#### 2.4.3. MJERAČI S PARALELNIM OTPORIMA

Mjerač protoka na principu paralelnih otpora ima primjenu na mjestima gdje, zbog varijacije temperatura, nastaje osjetna promjena viskoznosti fluida ( u području 0,2 do 1000 cSt ), čak i kod Reynoldsovih brojeva  $Re < 10$ . Mjerna se pouzdanost mjerača kreće u granicama  $\pm 1\%$ . Otpori su  $R_2$  i  $R_1$  različiti ( jer ostvaruju mjernu razliku tlaka ) no dijagonalnim smještajem paralelnih otpora nakon mjerenja vrijednosti razlike tlaka ( koja je razmjerna protoku ), osigurava se jednakost otpora pojedine grane, odnosno jednakost protoka kroz pojedine grane.

#### 2.4.4. MJERAČI U OBLIKU CIJEVNOG KOLJENA

Obično cijevno koljeno može se iskoristiti kao mjerač protoka. Hidrodinamički gledano, ima ova dobra svojstva : nema suženja presjeka, nema pomičnih mehaničkih dijelova, primjenljiv je za sve vrste fluida, karakteristika mu se ne mijenja bitno promjenom viskoznosti fluida, neovisan je o dužinama dovodne i odlazne dionice, primjenljiv je za mjerenje prilikom strujanja fluida u oba smjera. Mjerna se pouzdanost mjerača kreće u granicama od  $\pm 2\%$ . Zbog djelovanja centrifugalne sile na čestice fluida u koljenu pojavljuje se razlika statičkih tlakova između vanjske i unutrašnje izvodnice koljena. Ta je razlika tlakova razmjerna protoku kroz koljeno.

#### 2.4.5. MJERAČI S OKRETNOM ZAKLOPKOM

To je mjerni instrument relativno niske mjerne točnosti od  $\pm 5\%$ . Zbog optjecanja zaklopke pojavljuje se aktivna sila koja zaklopku zakreće oko okretišta. Taj je zakret razmjernan protoku i služi kao osnovna mjerna veličina. Zbog jednostavne konstrukcije, pouzdan je u praksi, a zbog niske mjerne točnosti ovakav se instrument pretežno rabi kao indikator protoka ili za grubu informaciju o veličini protoka.

## 2.5. VOLUMETRIČKI BROJAČI

Ova se velika se velika skupina mjerača protoka, kojih se princip mjerenja osniva na „brojenju“ periodične promjene poznatog volumena radnog prostora može na toj osnovi podijeliti na :

- a) **MJERAČI SA STALNIM VOLUMENOM MJERNE KOMORE**
- b) **MJERAČI S PERIODIČNO PROMJENLJIVIM VOLUMENOM MJERNE KOMORE**
- c) **MJERAČI S MJERNIM KRILCIMA**

### 2.5.1. MJERAČI SA STALNIM VOLUMENOM MJERNE KOMORE

Osnovna je značajka mjerača protoka iz ove skupine u principu rada, po kojem se stalni ( i poznati ) volumen pod malim predtlakom periodično puni fluidom i zatim okretanjem ili preokretanjem automatski prazni. Mjerna je veličina broj punjenja ( ili pražnjenja ) u jedinici vremena. Pogodni su i za mjerenje protoka i vrlo onečišćenih fluida. Mogu se postići mjerne pouzdanosti i do  $\pm 0,1\%$ .

#### 1) MJERAČ S MIRUJUĆIM MJERNIM VOLUMENOM

Mirujućí poznati mjerni volumen periodično se puni i prazni. Moguće je postići mjernu pouzdanost od  $\pm 0,1\%$ . Automatiziranjem postupka otvaranja i zatvaranja spremnika, kao i uvođenjem dvaju ili više spremnika, moguće je duže vrijeme obavljati vrlo preizna kontinuirana mjerenja protočnih količina.

#### 2) MJERAČ S PREKRETNIM MJERNIM VOLUMENOM

Mjerač se može konstruirati tako da ima promjenljivo težište u funkciji od ispunjenosti mjernog volumena. Kada se ovaj potpuno ispuni, posuda dolazi u neravnotežni položaj i prekreće se prazneći se pri tome. Mjeri se broj prekreta posuda u jedinici vremena. U trenutku prevrtanja manji dio kapljevine prođe pokraj mjernih posuda, tako da ovaj mjerač ima smanjenu mjernu pouzdanost s povećanjem protoka.

### 3) MJERAČ SA ZAKRETNIM MJERNIM PROSTOROM

Ovaj se mjerač naziva i bubnjasto brojilo ( od njem. Trommelzähler ) i sastoji se od nekoliko mjernih komora povezanih na osovinu brojača. Mjeri se broj okretaja osovine brojača. Ovaj se mjerač ( kao i prethodno spomenuti ) može uporabiti i za mjerenje protoka fizikalno različitih kapljevina. No točnost mjerenja ovisi o površinskoj napetosti i viskoznosti kapljevina. Zbog mogućnosti postizanja vrlo visokih mjernih pouzdanosti kod ovih mjerača protoka, oni se rabe za mjerenja protoka vrijednih kapljevina. Tako se oni upotrebljavaju kod poreznih ureda za kontrolu potrošnje alkohola.

## 2.5.2. MJERAČI (BROJILA) S PERIODIČNO PROMJENLJIVIM VOLUMENOM MJERNE KOMORE

Mjerači protoka s vremenski promjenljivom, ali periodično ponovljivom, promjenom volumena radnog prostora imaju povećanu mjernu nepouzdanost zbog propuštanja na brtvenim ploham i zbog ishlapljivanja upijenog plina u kapljevinama. Viskoznost kapljevine također ima značajnu ulogu kod mjerne nepouzdanosti. Općenito se može postići mjerna nepouzdanost u granicama od  $\pm 0,25\%$ .

### 1) BROJILO SA STAPOM

Brojila sa stapom imaju široku primjenu u praksi i kod plinova i kod kapljevina visoke viskoznosti i visokoga stupnja onečišćenosti. Mogu raditi i do tlakova od oko 30 bara. Stap i slavina H mehanički su povezani, tako da se pri dovršenju punjenja jedne strane ( pražnjenja druge ) slavina prebacuje u drugu poziciju čime počinje drugi ciklus. Brojila imaju mjernu nepouzdanost do  $\pm 0,3\%$ , koja se s vremenom može i mijenjati. Na istome principu rade i brojila s više stapova.

### 2) BROJILO S PRSTENASTIM STAPOM

Brojila s prstenastim stapom najčešće se primjenjuju za precizno mjerenje količine kapljevine ( voda i sl. ), kad brojila s krilcima ( npr. Woltman i sl. ) ne zadovoljavaju svojom točnošću. Pouzdanost mjerenja ovim brojilom kreće se u granicama  $\pm 0,2\%$  ( s benzinom i vodom i niže ).

### 3) BROJILO S OVALNIM ZUPČANICIMA

Ovo se brojilo pretežno rabi kod viskoznijih čistih kapljevina. Mogu se uporabiti i kod plinova. Relativnim pomicanjem zupčanika međusobno u kućištu mijenja se volumen prostora unutar kućišta. Mjerna se pouzdanost kreće od  $\pm 0,1\%$  do  $\pm 0,4\%$ , ovisno o protoku i vrsti fluida. Brojilo je vrlo pouzdano, a zbog velikih zakretnih ploha ostvaruje veliki zakretni moment, zbog čega uzrokuje male padove tlaka (hidrodinamičke gubitke). Zbog pouzdanosti u radu ovo se brojilo, osim za mjerenje protočnih količina kapljevina, upotrebljuje kao davač signala pri upravljanju i regulacije.

### 4) BROJILO S OKRETNIM DISKOM

Rabi se za viskoznije kapljevine, kao što su nafta i naftni derivati veće viskoznosti. Precizno obrađen disk, uležišten u ležaje kuglične forme u kuglastom kućištu, zbog djelovanja razlike tlaka između gornjeg i donjeg mjernog prostora izvodi njihajuće gibanje koje se preko para magneta pretvara u rotaciju osovine brojača. Zbog relativno niske mjerne pouzdanosti i vrlo skupe tehnologije izrade, ovo se brojilo sve manje primjenjuje u praksi.

### 5) BROJILO S ROTIRAJUĆIM STAPOVIMA

Brojilo se pretežno upotrebljuje za mjerenje potrošnje većih količina plina (plinovodi), kao i pri potrošnji većih količina industrijskih plinova. Za pouzdan rad zahtijeva veće tlakove plina, zbog čega u sistem unosi velike hidrodinamičke gubitke. Mjerna pouzdanost je nešto bolja od  $\pm 1\%$ . Može se poboljšati korekcijom preko tlaka, temperature i vlažnosti plina.

### 6) BROJILA ZA PLIN

Posebnu skupinu mjerača čine brojila za plin. Mogu biti:

Vlažno brojilo – manja se brojila rabe u laboratorijima za eksperimentalne svrhe, a veća se mogu uporabiti za kalibraciju drugih brojila. Kapljevina u brojilu služi kao zaporna kapljevina. Plin dolazi u komoru iznad zaporne kapljevine i zbog nastala uzgona pokreće osovinu brojača. Kod manjih protoka postižu se vrlo visoke pouzdanosti mjerenja ( $< \pm 0,1\%$ ).

Povećanjem protoka mjerna pouzdanost pada, no nikad nije  $> \pm 0,5\%$ . Granica je primjene mjerača do protoka od  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Suho brojilo – suhi mjerači protoka rabe se pri mjerenju potrošnje plina u kućanstvima i industriji. Komore pregrađuju dvije kožnate opne (kozja koža vrhunske kvalitete) koje se naizmjenice pune i prazne pokrećući pritom razvodnike komora i osovinu brojača. Mjerna pouzdanost manje je od vlažnih brojača ( $\sim \pm 0,5\%$ ), no praktičniji su za širu primjenu.

### 2.5.3. MJERAČI S MJERNIM KRILCIMA

Mjerači s mjernim krilcima općenito rade na principu mjerenja broja okretaja krilca koja pokreće fluid kojem se mjeri protok. Postoji razmjer između broja okretaja i volumenske protočne količine.

#### 1) WOLTMANOV MJERAČ

Primjenjuje se za mjerenja većih protoka kapljevina u industriji općenito. Postoje tipovi s vodoravnim i okomitim Woltmanovim kolom. Woltmanovo kolo jednostavno je kolo s približno ravnim lopaticama konstantne debljine. Mjerna se nepouzdanost kreće u granicama  $\pm 0,5\%$  u većem dijelu mjernog područja, dok se kod protoka manjih od 20% maksimalnog mjerna nepouzdanost penje i više od  $\pm 2\%$ .

#### 2) TURBINSKI MJERAČ

Turbinski mjerač je mjerač protoka slične konstrukcije kao i Woltmanov, samo što su lopatice kola profilirane. Zbog toga ti mjerači protoka imaju bolju mjernu pouzdanost ( $< \pm 0,3\%$ ) u većem dijelu mjernog područja. Pretežno se rabe kao mjerači protoka goriva.

#### 3) MJERAČ S LOPATIČNIM KOLOM

Primjenjuje se pretežno za mjerenje protoka vode u kućanstvima. Razlikuje se jednostrujni i višestrujni mjerači. Mjerna se pouzdanost kreće u granicama  $\pm 2\%$ . Kod manjih protoka mogu nastupiti značajne pogreške.

#### 4) MJERAČ S VIJČANIM KOLOM

Potreba za zbijenom konstrukcijom i većom mjernom pouzdanošću dovela je do razvoja mjerača protoka s vijčanim krilom. Vijčano se krilo sastoji od tridesetak lopatica jednostavna profila jednake debljine. Principijelno radi kao Woltmanov i turbinski mjerač protoka, no njime se ( zbog većeg broja lopatica ) postižu veće mjerne pouzdanosti (  $< \pm 1\%$  ). Pogodan je za mjerenje i onečišćenih fluida. Izvodi se isključivo za vodoravnu ugradnju.

### 2.6. MJERAČI NA PRINCIPU ELEKTROMAGNETSKOG EFEKTA

Pretpostavka za moguću primjenu ovih mjerača jest električna vodljivost radnog fluida u granicama od 50 do 5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Metodika ovog mjerenja počiva na Faradayevu zakonu elektromagnetske indukcije. Zavojnicama oko cijevi proizvodi se jako elektromagnetsko polje u cijevi. Čestice vodljivog fluida presijecaju magnetsko polje, zbog čega se u fluidu inducira napon koji je razmjern brzini fluida. Napon  $V$  mjeren ba elektrodama mjerilo je protoka.

### 2.7. PRELJEVI I KANALI PROMJENLJIVOG PRESJEKA

Mjerenje protoka s pomoću preljeva i kanala promjenljiva presjeka primjenjuje se pri mjerenju protoka većih količina vode, primjerice kod prirodnih vodotokova ili prilikom mjerenja na većim hidroenergetskim postrojenjima ( crpne stanice, hidroelektrane i sl. ).

### 2.7.1. PRELJEVI

Visina vode iznad ruba pregrade preljeva, mjerena dovoljno daleko ispred pregrade, mjerilo je protoka. Na točnost određivanja protočne količine na preljevu utječu oblik pregrade te ostale izmjere kanala.

Protok se može izračunati prema *Rehbokovoj formuli*:

$$Q = \left( 0,4023 + 0,0542 \frac{h_e}{s} \right) B \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} \left[ \frac{m^3}{s} \right],$$

pri čemu je :

$$h_e = h + 0,011 [m],$$

$B(m)$  – širina kanala

*Ograničenja su primjene ove formule :*

$$0,1m < h < 0,8m$$

$$s > 0,3m$$

$$\frac{h}{s} < 1$$

Prema formi preljeva rabe se puni preljev, djelomični preljev, trokutasti preljev, trapezni preljev i polukružni preljev.

### 2.7.2. KANALI PROMJENLJIVA PRESJEKA

U otvorenim se vodotocima mogu izvesti standardizirana suženja presjeka kod kojih se mjerenjem pada razine ispred i u suženom dijelu kanala dobiva informacija o protoku. Kod ovakvih mjerača dolazi do prirodne pojave skoka razine poznatog fenomena kod otvorenih tokova.



## 2.8. MJERAČI NA PRINCIPU POSEBNIH EFEKATA

### 2.8.1. PULZIRAJUĆI VRTLOZI

Opstrujavanjem tijela s realnim fluidom na bokovima se tijela naizmjenično odvajaju vrtlozi, a to je efekt poznat kao *von Karmanovi vrtlozi*. U određenim uvjetima (  $Re > 3800$  ) frekvencija odvajanja vrtloga razmjerna je protoku. Tijelo koje se opstrujava može imati različite forme presjeka. Činjenica da se u praksi najčešće susreću mjeraci s formom „c“, upućuje na to da je ova forma optimalna.

### 2.8.2. ULTRAZVUČNA METODA

#### 1) METODA MJERENJA PROLAZNOG VREMENA

Mjerenje se temelji na činjenici da se ultrazvučni val rasprostire brže niz struju, nego uz struju fluida. Mjeri se razlika vremena prostiranja ultrazvuka niz struju i uz struju. Pretpostavka: brzina rasprostiranja ultrazvučnog vala  $c$  puno je veća od brzine protjecanja fluida  $v$ .

#### 2) IMPULSNA METODA

Na početku je S1 zatvorena. Ultrazvučni val putuje od TX1 do RX1. Kada se nakon vremena  $t_1$  pojavi anvelopa signala na izlazu demodulatora D1, S1 se otvori i ostaje otvorena tako dugo dok anvelopa ne padne na nulu, kada se ponovo zatvara. Isto vrijedi i za S2.

#### 3) UNAKRSNA METODA

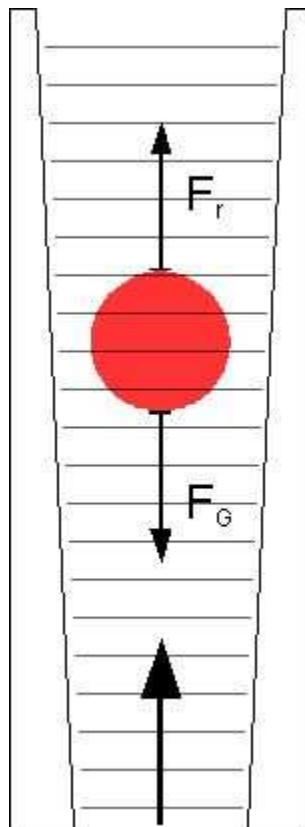
Istovremeno šaljemo dva ultrazvučna vala: jedan u smjeru, a drugi suprotno od smjera strujanja. Ta dva signala dovode se na bistabil. Prvi signal postavlja bistabil u stanje „1“, a drugi ga signal vraća u stanje „0“ (resetira). Na izlazu bistabila dobiva se pravokutni impuls čije je trajanje proporcionalno brzini protjecanja fluida.

### 3. ROTAMETRI (MJERAČI S LEBDEĆIM TIJELOM)

Rotametar je najčešće upotrebljavani uređaj za mjerenje protoka u laboratoriju, a često se koristi i u procesnoj industriji. Velika zastupljenost rotametra je posljedica jednostavnosti uređaja, široke primjenljivosti s obzirom na mogućnost mjerenja protoka plinova i kapljevina i vrlo veliki mjerni opseg.

Karakteristike rotametra:

- linearna karakteristika
- mali pad tlaka, konstantan i neovisan o protoku
- dinamika 10:1
- raspon mjerenja protoka od 0.04 l/h do 150 m<sup>3</sup>/h
- točnost od 0.4% do 40% maksimalnog protoka
- predviđeni su za vertikalnu ugradnju



Slika.3.1. Princip mjerenja rotametrom

### 3.1. MJERENJE ROTAMETROM

Mjerenje rotametrom se također zasniva na povezanosti pada tlaka koji nastaje protjecanjem kroz suženje i protoka tekućine. Za razliku od ugrađenih suženja koja imaju konstantan otvor, kod rotametara je površina suženja promjenljiva. Suženje tvori element (ronilo) koji je uronjen u tekućini koja protječe kroz prozirnu vertikalnu cijev. Cijev ima promjenljivi radijus, najuži presjek je na ulazu u cijev a najširi na izlazu. Tekućina protječe kroz prsten između ronila i cijevi. Položaj ravnoteže određen je težinom ronila ( $G$ ), uzgonom ( $F_U$ ) i silom ( $F_T$ ) kojom tekućina djeluje na ronilo. Mjerni signal je položaj ronila ( $x$ ) koji se očitava na skali uz cijev.

U ravnotežnom položaju ronila vrijedi jednakost  $F_U + F_T = G$

Izrazimo sile pomoću parametara :

$$F_U = \rho_T \cdot V_R \cdot g$$

$$F_G = \rho_R \cdot V_R \cdot g$$

$$F_T = f_T \cdot S_R \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_T \cdot v^2$$

$\rho_T$  i  $\rho_R$  su gustoće tekućine i ronila

$V_R$  i  $S_R$  su volumen i površina ronila

$v$  je srednja brzina tekućine

$f_T$  je faktor trenja između tekućine i ronila

$g$  je ubrzanje sile teže

Uvrstimo izraze za sile u jednadžbu ravnoteže:

$$\rho_T \cdot V_R \cdot g + f_T \cdot S_R \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_T \cdot v^2 = \rho_R \cdot V_R \cdot g$$

Izrazimo brzinu tekućine :

$$v = \sqrt{\left(2 \cdot \frac{g}{f_R} \cdot \frac{V_R}{S_R} \cdot \left(\frac{\rho_R}{\rho_T} - 1\right)\right)}$$

Volumni protok tekućine je određen produktom površine otvora između ronila i cijevi i srednje brzine tekućine

$$Q_V = v \cdot S$$

Površinu otvora suženja izračunamo tako da dobijemo od površine veće kružnice ( cijevi ) površinu manje kružnice ( ronila ) :

$$S = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \pi - \left(\frac{D_0}{2}\right)^2 \cdot \pi$$

Izrazimo relaciju između dijametara i kuta unutrašnje stjenke s vertikalom:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{D - D_0}{2 \cdot x}$$

uvrstimo u izraz za površinu

$$S = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot [(D_0 + 2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot x)^2 - D_0^2]$$

Kvadriramo izraz u okrugloj zagradi i zanemarimo iznos kvadrata  $\operatorname{tg}^2(\alpha)$  jer je kut  $\alpha$  vrlo mali po iznosu, te nakon sređivanja izraza dobijemo za površinu suženja

$$S = \pi \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot D_0 \cdot x$$

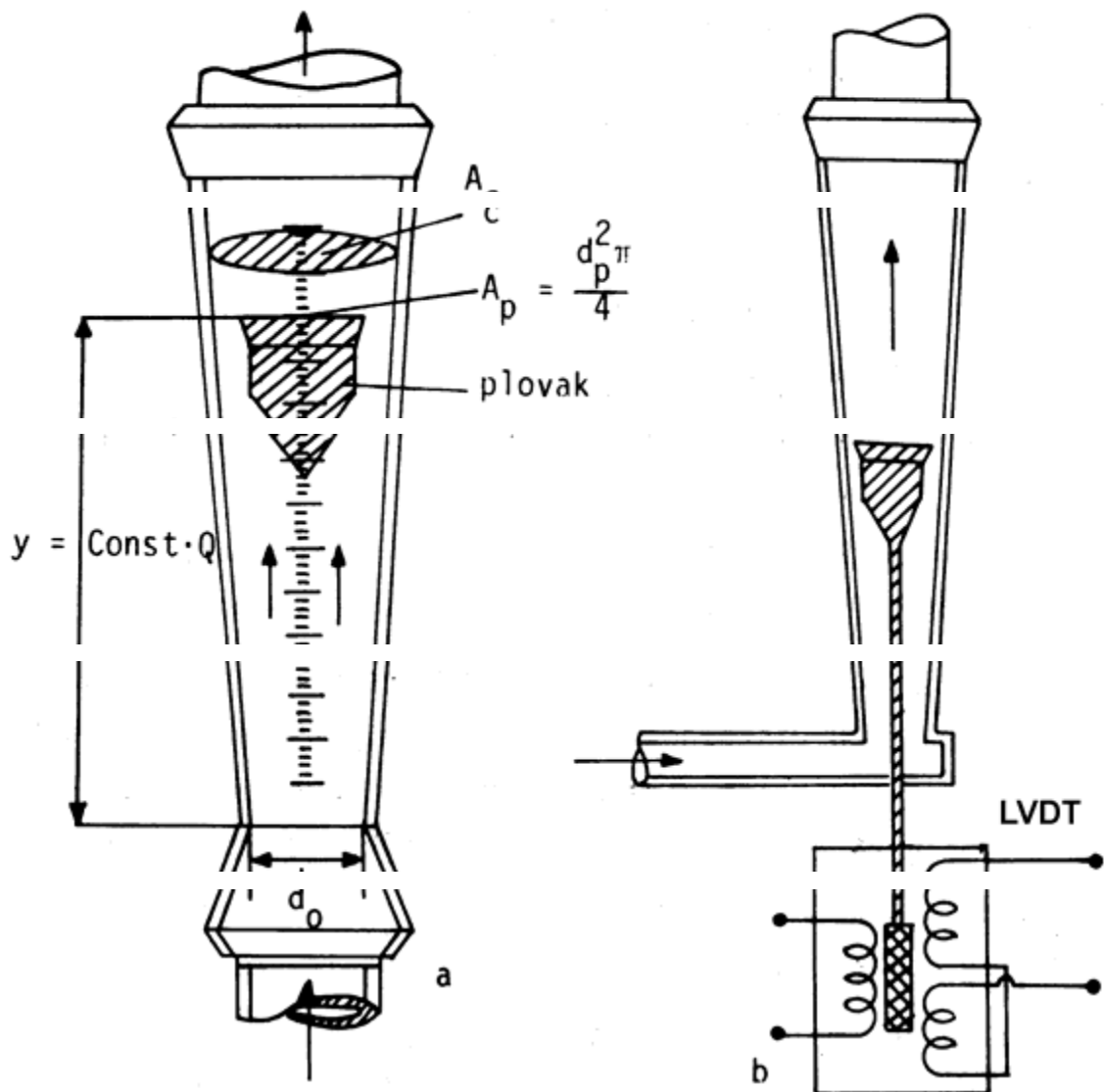
Nakon uvrštavanja površine u izraz za protok dobije se konačan rezultat

$$q_V = \pi \cdot tg(\alpha) \cdot D_0 \cdot \sqrt{\left(2 \cdot \frac{g}{f_T} \cdot \frac{V_R}{S_R} \cdot \left(\frac{\rho_R}{\rho_T} - 1\right)\right)} \cdot x$$

Izvedeni rezultat ukazuje kako pojedini parametri utječu na baždarnu karakteristiku. Svojstva tekućine, gustoća i viskozitet, određuju silu uzgona i silu trenja, tako da se baždarna karakteristika jako mijenja promjenom tekućine. Zato je potrebno rotametar uvijek baždariti za odabranu tekućinu, kapljevinu ili plin i uz standardne uvjete. Ako se promjeni temperatura ili tlak tekućine mijenjaju se gustoća i viskozitet i time se bitno mijenja karakteristika.

### 3.2. GRAĐA ROTAMETRA

Osnovni dijelovi rotametra su vertikalna konusna cijev i plovak kružnog presjeka koji se slobodno kreće ovisno o brzini, odnosno protoku fluida. Specifična težina plovka veća je od specifične težine fluida, pa se pri brzini jednakoj nuli plovak nalazi na dnu cijevi. Uslijed kretanja fluida plovak se penje do visine proporcionalne protoku. Pri konstantnom protoku težina plovka umanjena za silu uzgona jednaka je sili uslijed razlike tlakova ispod i iznad plovka.



Slika 3.2. Građa rotametra

$$gV_p(\rho_p - \rho_f) = A_p(p_1 - p_2)$$

$$(p_1 - p_2) = \frac{gV_p}{A_p}(\rho_p - \rho_f)$$

$V_p$  – volumen plovka

$A_p$  – maksimalni presjek plovka

$\rho_p$  – gustoća plovka

$\rho_f$  – gustoća fluida

$v_1 = 0$  jer plovak miruje na određenoj visini

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_f}} = \sqrt{\frac{2gV_p(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f A_p}}$$

$$Q = (A_{cy} - A_p)v_2$$

$A_{cy}$  – presjek cijevi na visini  $y$  – za konusnu cijev se približno mijenja s  $y$

Ronila se izrađuju u različitim oblicima i iz materijala kao što je staklo, metal i plastika. Izborom materijala mijenja se gustoća ronila a oblik bitno utječe na faktor trenja tako da se podešavanjem tih parametara može postići podešavanje mjernog opsega od vrlo malih protoka do velikih protoka koji dolaze u industrijskim pogonima.

### 3.3. PREGLED KARAKTERISTIKA

- mjerni signal je položaj ronila
- mjerenje protoka kapljevina i plinova
- široko mjerno područje, naročito za mjerenje vrlo malih protoka
- mjerenje se može provesti pri različitim temperaturama i tlakovima
- baždarenje se mora provesti posebno za svaku tekucinu i uvjete ( temperaturu i tlak)
- kod baždarenja treba osigurati stalnu temperaturu i tlak, čistoću tekućine, položaj cijevi rotametra mora biti strogo vertikalna i eliminirati vrtloženje tekućine prije ulaska u cijev rotametra
- stalni pad tlaka na rotametri
- dobra točnost mjerenja ali bitno zavisi od točnosti baždarne karakteristike
- loša strana rotametara je nemogućnost mjerenja protoka tekućina u kojima ima krutih čestica ( biomase) ili kapljevina sa mjehurićima plinova
- za pretvaranje položaja ronila u električni signal potrebno je upotrijebiti transformator razlike ( ronilo je mehanički povezano sa jezgrom transformatora ) ili elektromehaničko slijedilo pomaka ronila

### 3.4. VRSTE ROTAMETARA

#### 3.4.1. STAKLENI ROTAMETRI

Osnovni rotametar je izrađen kao staklena cijev. Cijev je precizno formirana od borosilikatnog stakla dok je plovak izrađen od metala, stakla ili plastike. Metalni plovak obično je izrađen od nehrđajućeg čelika kako bi osigurao otpornost na koroziju. Ima oštri rub za mjerenje gdje se očitava na skali uz cijev. Bitni elementi su cijevi i plovak, jer taj dio rotametra osigurava mjerenje. Skala rotametra može se kalibrirati za izravno očitavanje zraka ili vode, ili može imati skalu za očitavanje postotka raspona ili proizvoljan skalu koja se koristi sa jednadžbama za pretvaranje ili dijagramima. Sigurnosno zaštićene staklene cijevi rotametra su u općoj upotrebi u cijeloj industriji za mjerenje i tekućina i plinova. Jedinici fluidi za koje ovi rotametri nisu prikladni su oni koji agresivna svojstva prema staklu, kao što je voda sa temperaturom



preko 90°C, koja svojim visokim pH omekšava stakla, mokra para, koja ima isti učinak, soda , koja otapa staklo, i fluorovodična kiselina. Primarna ograničenja rotametara su granice tlaka i temperature u staklenoj cijevi. Male, 6 mm cijevi su pogodne za radne tlakove do 35 bara, ali radni tlak za velike 51 mm cijevi može biti niziak i do 7 bara. Temperaturna granica za staklene rotametre je 204°C, iako rad na takvim visokim temperaturama znatno smanjuje radni tlak. Općenito, postoji linearni odnos između radne temperature i tlaka.

### 3.4.2. METALNI ROTAMETRI

Za više tlakove i temperature izvan granica koje mogu podnijeti staklene cijevi koriste se metalni rotametri. Obično su izrađeni od aluminijske, nehrđajućeg čelika ili mesinga. Položaj klipa je određen magnetski ili mehaničkim očitovanjem izvan metalne cijevi. Princip je sličan kao kod staklenih rotametara a cijela izrada mora odgovarati potrebama same instalacije. Ovi rotametri se koriste na mjestima gdje su visoki radni tlakovi i temperature, vođeni udari ili ostale sile koje bi oštetile stakleni rotametar. Često se koriste u parnim sustavima.

### 3.4.3. PLASTIČNI ROTAMETRI

Plastični rotametri se također ponegdje koriste zbog jeftine izrade i s obzirom da mogu izdržati jake udare. Izrađeni su od polikarbonata, sa metalnim ili plastičnim dijelovima. Rotametri sa cijelom plastičnom izradom su korišteni u sustavima gdje se nemogu tolerirati metalni dijelovi.

## 4. UMJERAVANJE ROTAMETRA

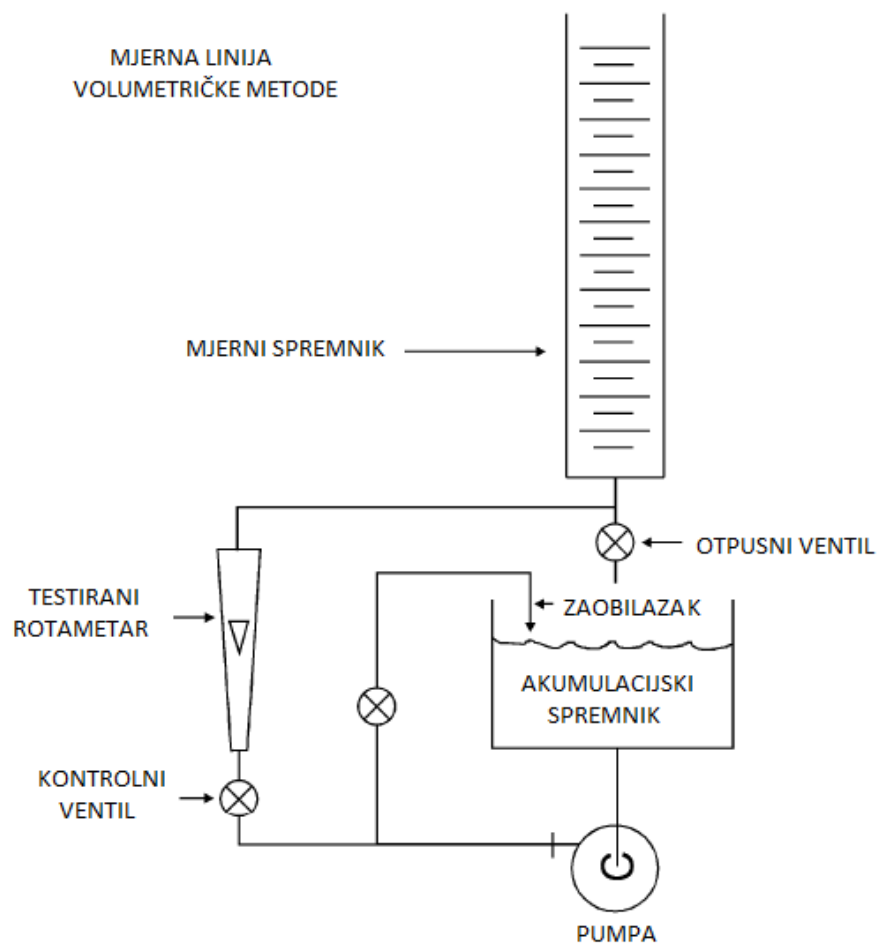
Potreba za ovim postupkom javila se 1954. godine u rujnu od strane korisnika rotametara. U početku je postupak bio namjenjen za tadašnjih dvijestopedeset korisnika i proizvođača rotametara. Ovaj postupak je pripremljen na način da opsuje metode i opremu korištenu za umjeravanje staklenih i metalnih cijevnih rotametara.

Prilikom umjeravanja rotametra moraju se u obzir uzeti tehnike za određivanje valjane opreme i postupaka. Odabire se oprema za kontroliranje protoka, mjerenje volumena, intervala. Sva oprema mora imati određenu točnost pri mjerenju. Uporaba rotametra će diktirati preciznost umjeravanja. Kada se rotametar koristi kao uređaj za indicaciju protoka i kada je učestalost očitavanja vrlo važna, rotametar može biti umjeravan sa referentnim fluidom kao što je voda. Ako je točnost mjerenja najvažnija, rotametar je potrebno umjeriti sa procesnim fluidom s kojim će se kasnije i mjeriti ili je potrebno primijeniti kinematsku simulaciju kako bi se postigla najveća moguća točnost.

Koriste se tri metode umjeravanja rotametara. Volumetrička, gravimetrijski i usporedna metoda.

### 4.1. VOLUMETRIČKA METODA

U ovoj metodi precizno se mjeri volumen fluida i vrijeme potrebno da prođe kroz rotametar prema komori i sve to uz kontrolirani protok. U ovoj metodi se koristi spremnik sa plinom, staklene cjevčice za mjerenje fluida, i sistem cijevi koji omogućuje direktno mjerenje volumena.



Slika 4.1. Mjerna linija volumetričke metode

### Tekućine

Kod umjeravanja tekućinama, kolektorske komore mogu varirati od malenih standardnih cjevčica za umjeravanje malih rotametara do velikih precizno umjerenih spremnika za umjeravanje većih instrumenata.

$$Q_m = \frac{V_c}{Sec} \times 60 \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho_m)\rho_c}{(\rho_f - \rho_c)\rho_m}}$$

$Q_m$  = Volumni protok tekućine mjerene u jedinici po minuti

$V_c$  = Volumen mjerene tekućine skupljene u jedinice sastavljene od  $Q_m$

$Sec$  = Vrijeme skupljanja tekućine u sekundama

$\rho_f$  = Gustoća od mjeračkog plovka

$\rho_m$  = Gustoća tekućine koja se mjeri

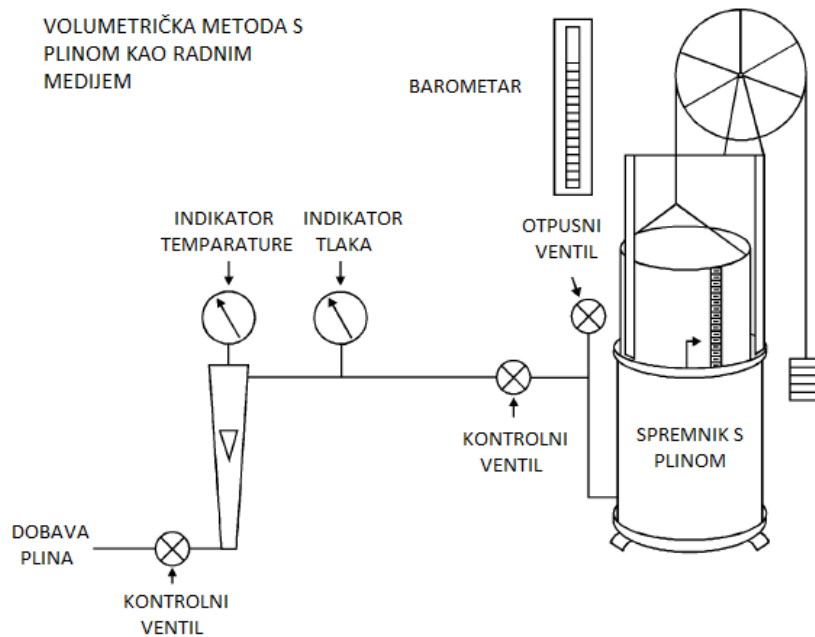
$\rho_c$  = Gustoća tekućine koja se umjerava

### Tekućine i plinovi

Veći rotametri se mogu umjeravati volumetrijski koristeći vodu kao protočni medij.

### Plinovi

Za umjeravanje rotametara sa plinom koriste se, naravno, spremnici sa plinom prikazan na slici. Plin uz određeni protok, temperaturu i tlak struji kroz rotametar te se skuplja u obliku obrnutog zvona.



Slika 4.2. Mjerna linija volumetričke metode (plin kao fluid)

## 4.2. GRAVIMETRIJSKA METODA

U ovoj metodi tekućina prolazi kroz rotametar određenim protokom i skuplja se u kolektorskom spremniku. Težina tekućine se mjeri preciznom skalom ili nekim drugim mjernim instrumentom za težinu. Vrijeme protoka se zabilježava dok se protok direktno izračunava u gravimetrijskim jedinicama pomoću očitavanja sa skale u vremenskim periodima. Upotrebom fotočelija ili živinih uređaja za mjerenje vremena se postiže automatizacija postupaka. Za razliku od volumetričke metode, očitavanja dobivena gravimetrijskom metodom se neovisna o gustoći ili viskoznosti fluida.

$$W_m = \frac{W_c}{Sec} \times 60 \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho_m)\rho_m}{(\rho_f - \rho_c)\rho_c}}$$

$W_m$  = Maseni protok tekućine mjerene u jedinici po minuti

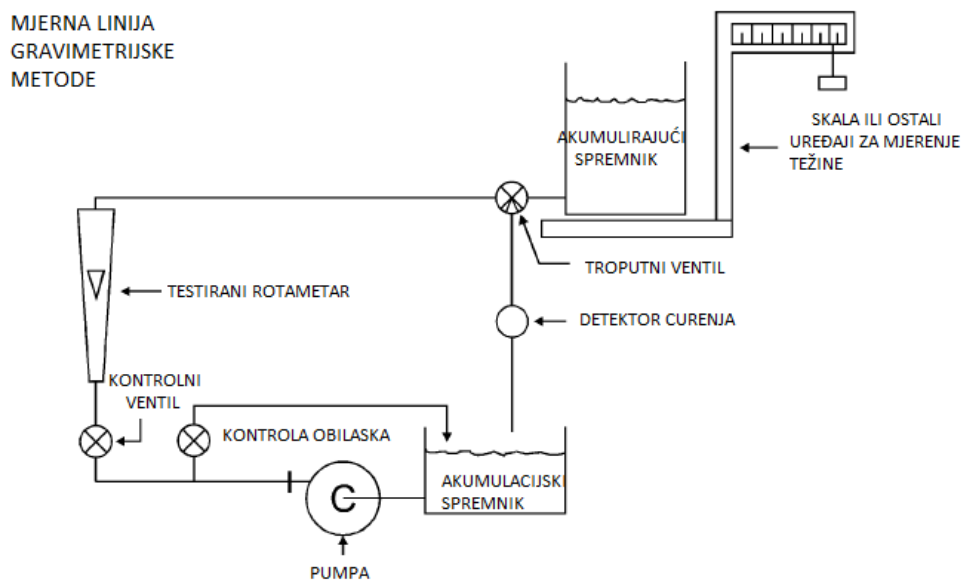
$W_c$  = Težina umjeravanog fluida

$Sec$  = Vrijeme skupljanja tekućine u sekundama

$\rho_f$  = Gustoća od mjeračkog plovka

$\rho_m$  = Gustoća tekućine koja se mjeri

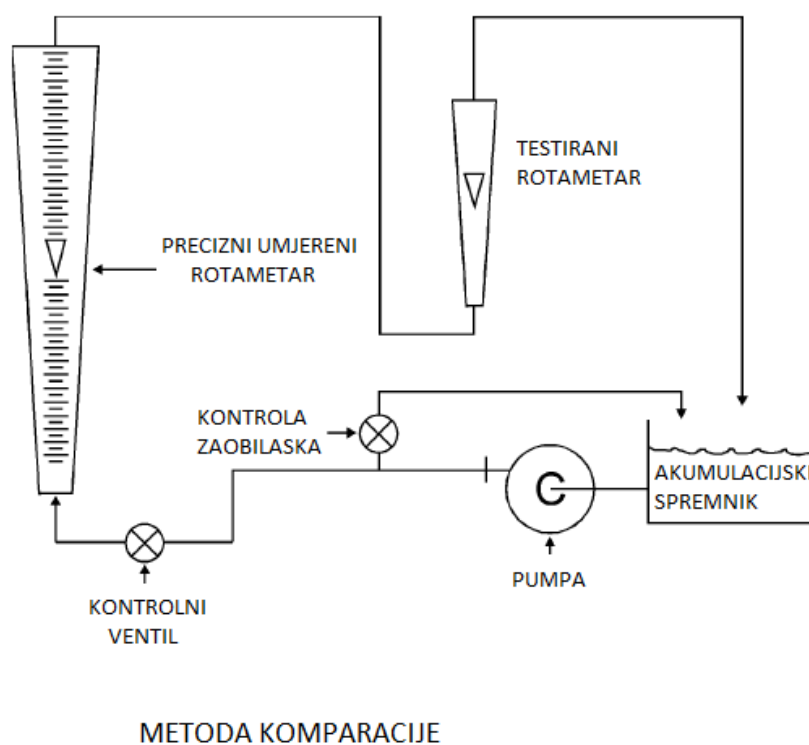
$\rho_c$  = Gustoća tekućine koja se umjerava



Sika 4.3. Mjerna linija gravimetrijske metode

### 4.3. USPOREDNA METODA

Umjeravanje tekućina i plinova se postiže usporedbom testiranog rotametra i precizno umjerenog instrumenta za mjerenje protoka. Točnost umjeravanja će u potpunosti ovisiti o preciznosti umjerenog instrumenta za mjerenje protoka koji se koristi kao etalon.



Slika 4.4. Mjerna linija usporedne metode

#### 4.4. KINEMATIČKA SIMULACIJA

Kada je nemoguće umjeriti rotametre direktno zbog utjecaja viskoznosti, zbog sigurnosnih opasnosti ili zbog ekonomskih razloga, koristi se kinematička simulacija svojstava fluida.

Uporabom različitih fluida i održavanjem kontroliranih temperaturnih uvjeta, viskoznih uvjeta i gustoće, mogu se postići fizička svojstva fluida za koji je rotametar i napravljan.

#### 4.5. PROVJERA

Bilo koja od gore navedenih metoda se može koristiti za provjeru rotametara. Jamčenje spremnika se koristi prilikom provjere rotametara za tekućine, a metoda premještanja za rotametre koji koriste plinove. Rezultati će biti srazmjerni s zaštitom tijekom umjeravanja i preciznošću postrojenja.

##### Primjer postupka

Obično se smatra da mjerni instrumenti moraju biti odgovarajuće umjereni i da nesmije biti prekomjernih fluktuacija. Međutim, greške su uvijek prisutne kod eksperimentalnih mjerenja. Ove greške mogu biti uzrokovane ljudskim faktorom i/ili neodgovarajućem umjeravanju ili nesigurnostima u uređajima. Tako su na primjer rotametri obično tvornički umjeravani za upotrebu sa određenim fluidima, pri određenim temperaturama i tlakovima. Upotreba istih, pri različitim temperaturnim i tlačnim uvjetima kao i različitim fluidima će zahtijevati ponovno umjeravanje ovih uređaja kako bi se osigurala precizna mjerenja i očitavanja.

##### Procedura

Ispuniti  $\frac{3}{4}$  donjeg spremnika vodom. Provjeriti da su svi ventili zatvoreni. Uključiti pumpu i pustiti da se gornji spremnik napuni vodom sve dok se ne napuni do te mjere da voda izlazi iz narančaste cijevi. Rotametar na samoj lijevoj strani mjeri od 0.1 galona po minuti (3,785/10 litara po minuti) do 1 (3,758 L/s) galon po minuti. Rotametar s desne strane mjeri od 0.2 (0,757 L/s) galona po minuti do 3.2 (12,112 L/s). Otvoriti ili zatvoriti crveni kuglaste ventile tako da se otvori krug za umjeravanje rotametra. Koristeći crvene zasune, kontrolirati volumni protok kroz primjenjene rotametre uz odgovarajuće povećanje. Mjeriti koliko je potrebno da se mjerni cilindar na desnoj strani napuni određenim volumenom sa preciznom štopericom.



Kad se mjerni cilindar napuni do ciljanog volumena, zabilježiti volumen i vrijeme u tablicu i otvoriti otpusni ventil na slavini smještenoj na dnu mjernog cilindra kako bi ispustili vodu. Ponoviti ovaj postupak za svako povećanje sve dok se ne ispita cijela skala rotametra.

### Analiza

Sljedeće jednačbe se koriste kako bi se odredila mjerna nesigurnost:

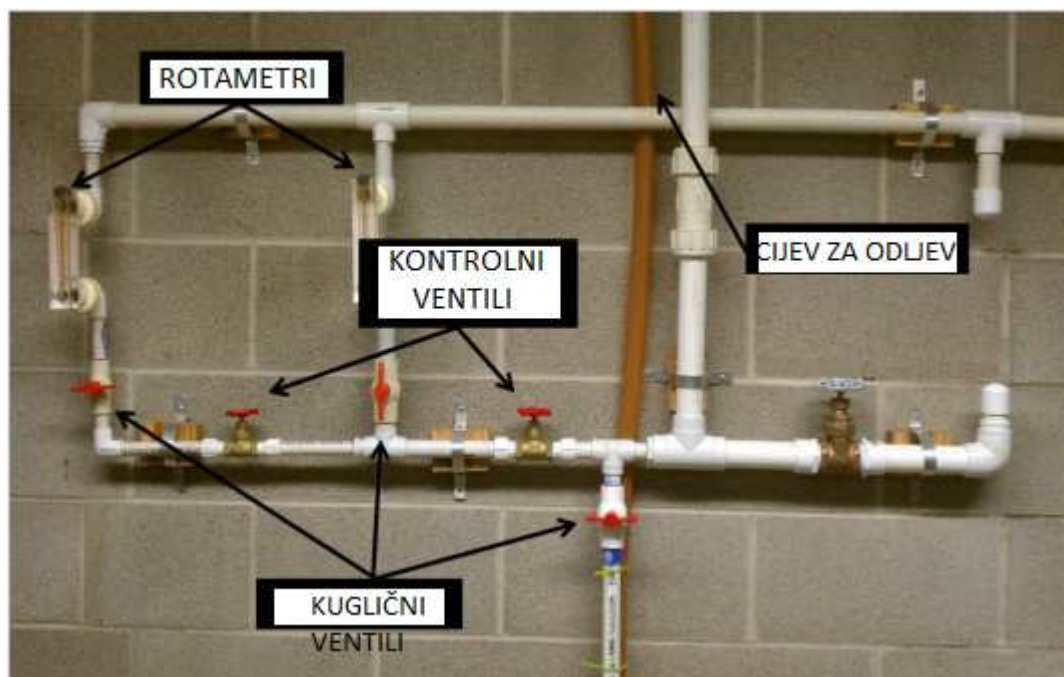
$$U_V = V \left[ \left( \frac{U_A}{A} \right)^2 + \left( \frac{U_t}{t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$U_V$  : nesigurnost/greška u eksperimentalno dobivenom volumnom protoku

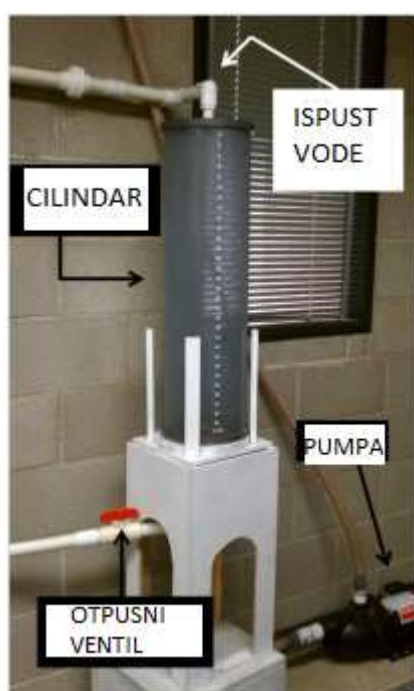
$U_A$  : nesigurnost/greška u izračunu volumena

$U_t$  : nesigurnost/greška u izračunu vremena, t

Izračunati eksperimentalni volumni protok, nesigurnost u proračunatom eksperimentalnom volumnom protoku, i minimalne i maksimalne vrijednosti mjernih nesigurnosti. Napraviti graf sa eksperimentalnim protokom i protokom rotametra. Obavezno uzeti u obzir mjerne nesigurnosti ili greške.



Slika 4.5. Prikaz mjerne linije prilikom pokusa (1)



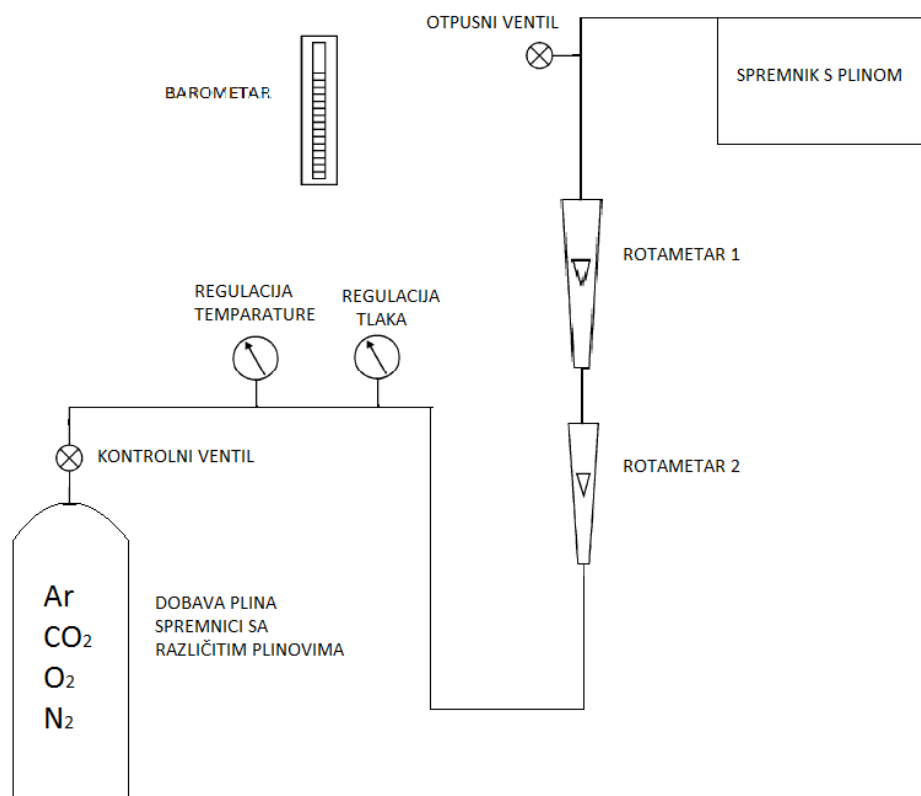
Slika 4.6. Prikaz mjerne linije prilikom pokusa (2)

## 5. REZULTATI MJERENJA PROTOČNE KOLIČINE FLUIDA

Mjerenja su provedena u vrhunskom laboratoriju koji se specijalizirao za servis, ispitivanje, ovjeravanje i umjeravanje svih vrsta mjerila tlaka i temperature. Ovlašteni od Državnog zavoda za mjeriteljstvo – kao ovlaštteni servis (oznake 606) i Hrvatskog registra brodova.

ROTAMETRI : VA 40 V/R, KROHNE

- maksimalna dopuštena pogreška – 1%
- kalibracijski fluid – zrak



Slika 5.1. Mjerna linija u laboratoriju

## REZULTATI KALIBRACIJE (PODACI SA KALIBRACIJSKOG CERTIFIKATA) :

## ROTAMETAR 1

KALIBRACIJSKA VRIJEDNOST (l/h)	NOMINALNA VRIJEDNOST (l/min)	PRAVA VRIJEDNOST (l/mina)	ODSTUPANJE (%)	DOPUŠTENO ODSTUPANJE (%)
3783	30	29,9	-0,33	1,00
3141	25	25	0,00	1,00
1854	15	15	0,00	1,00
1217	10	10	0,00	1,50
367,5	3,2	3,2	0,00	4,69

## ROTAMETAR 2

KALIBRACIJSKA VRIJEDNOST (l/h)	NOMINALNA VRIJEDNOST (l/min)	PRAVA VRIJEDNOST (l/mina)	ODSTUPANJE (%)	DOPUŠTENO ODSTUPANJE (%)
1801	20	20	0,00	1,00
1433	16	16	0,00	1,00
1067	12	12,05	0,42	1,00
702,5	8	8	0,00	1,25
164,5	2	1,9	-5,00	5,00

Tablica 5.1. Podaci sa certifikata pojedinog rotametra

KALIBRACIJSKI PODACI

## ROTAMETAR 1

MJERNI OPSEG	3,2 - 30 l/min
MEDIJ	ARGON
GUSTOĆA	1,784 kg/m <sup>3</sup>
VISKOZNOST	0,02215 mPa · s
TEMPARATURA	20 °C
RADNI TLAK	3 bar

Tablica 5.2. Podaci o rotametru 1

## ROTAMETAR 2

MJERNI OPSEG	2 - 20 l/min
MEDIJ	ARGON
GUSTOĆA	1,784 kg/m <sup>3</sup>
VISKOZNOST	0,022 mPa · s
TEMPARATURA	20 °C
RADNI TLAK	1 bar

Tablica 5.3. Podaci o rotametru 2

**REZULTATI MJERENJA U BMB LABORATORIJU BRCKOVIĆ**

Mjerenje s 4 različite vrste fluida (kisik, argon, dušik, ugljikov dioksid), s dva crijeva različitih promjera (13/9 mm, 6/4 mm).

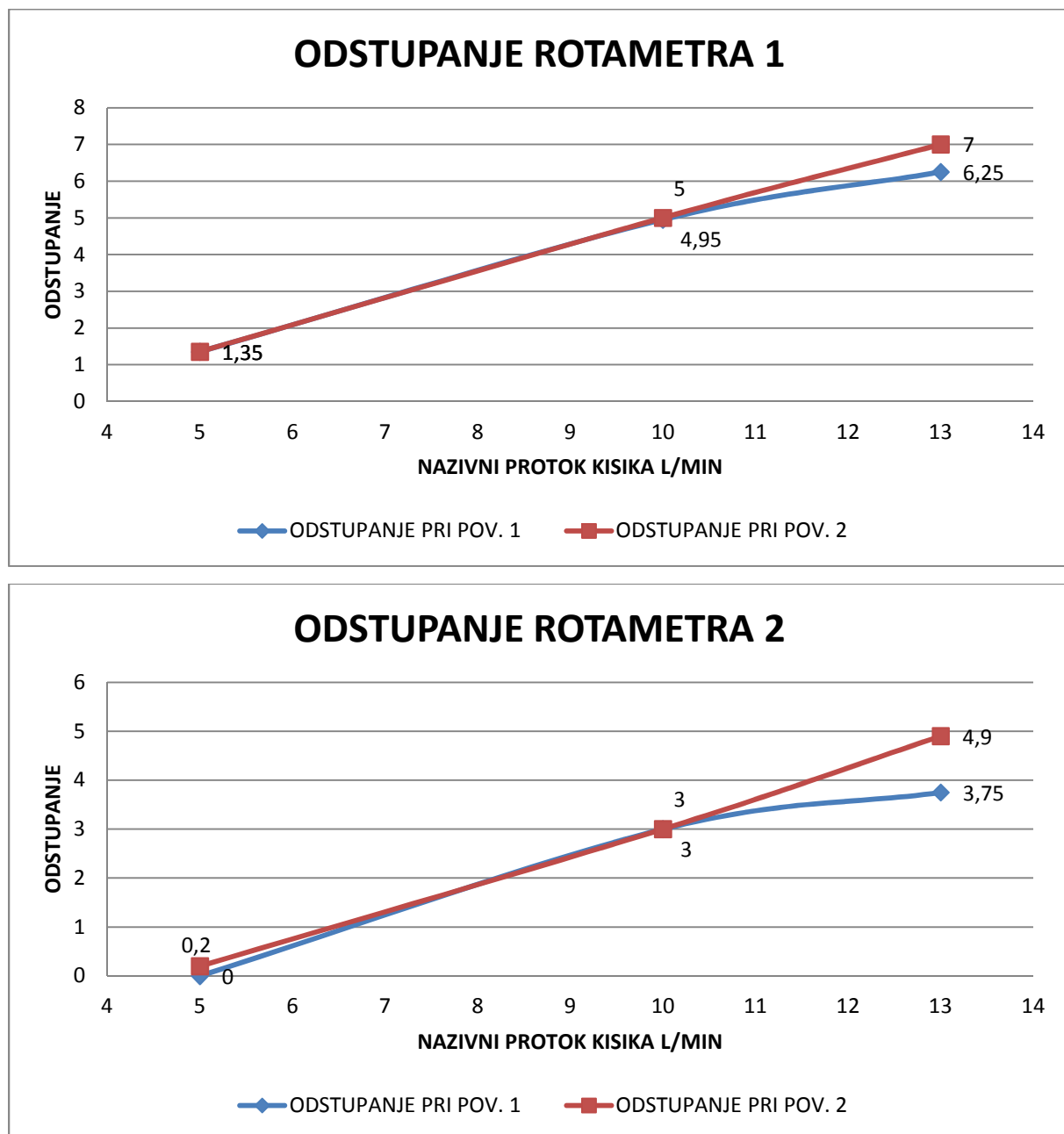
FLUID	TEMPARATURA (°C)	TLAK NA MANOMETRU (bar)	PROTOK (l/min)	ROTAMET AR 1 (l/min)	ROTAMET AR 2 (l/min)	PROMJER CRIJEVA (mm <sup>2</sup> )
KISIK	19,6	190	5	3,65	5	12,57
	19,6	190	10	5,05	7	12,57
	19,6	190	13	6,75	9,25	12,57
	19,4	190	5	3,65	4,8	3,14
	19,4	190	10	5	7	3,14
	19,4	190	13	6	8,1	3,14
ARGON	19,5	2	6	3,2	4,5	12,57
	19,5	2	8	4,3	6	12,57
	19,5	2	10	5,4	7,2	12,57
	19,5	2	6	3,2	4,25	3,14
	19,5	2	8	4,3	5,75	3,14
	19,5	2	10	5,3	6,6	3,14
DUŠIK	19,3	105	4	2,6	3	12,57
	19,3	105	6	3,2	5	12,57
	19,3	105	8	4,1	6	12,57
	19,3	105	10	5,5	7	12,57
	19,4	105	4	2,8	3	3,14
	19,4	105	6	3,2	4,25	3,14
	19,4	105	8	5	6,95	3,14
UGLJIČNI DIOKSID	19,4	6	8	3,9	5	12,57
	19,4	6	9	4,5	5,9	12,57
	19,4	6	6	2,9	3,6	3,14
	19,4	6	8	4	5,1	3,14

Tablica 5.4. Rezultati mjerenja s različitim fluidima

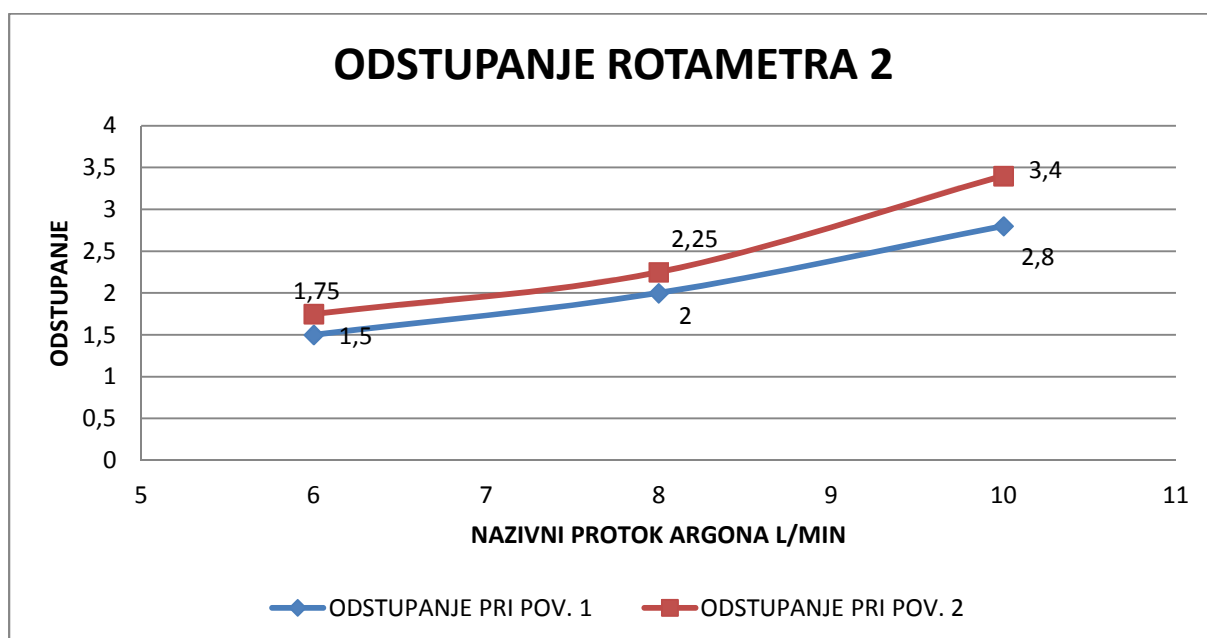
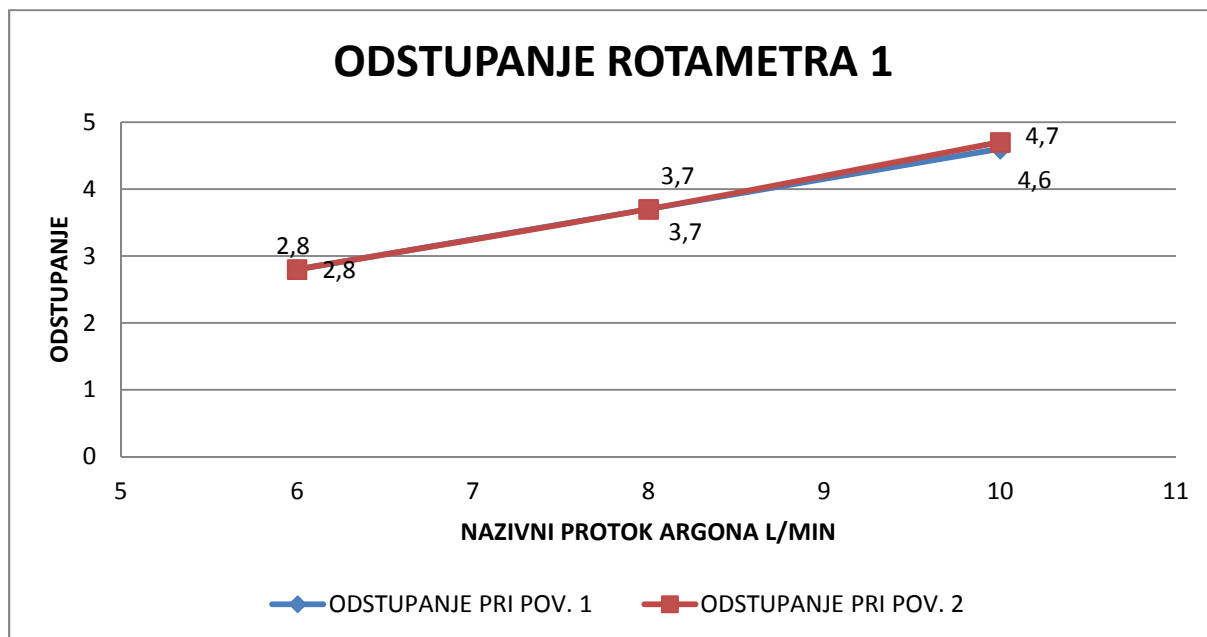
FLUID	GUSTOĆA	APSOLUTNI TLAK
KISIK	1,429 kg/m <sup>3</sup>	997,2 hPa
ARGON	1,784 kg/m <sup>3</sup>	997,2 hPa
DUŠIK	1,251 kg/m <sup>3</sup>	997,2 hPa
UGLJIKOV DIOKSID	1,98 kg/m <sup>3</sup>	997,2 hPa

Tablica 5.5. Gustoća pojedinog fluida

U slijedećim dijagramima pokazana je ovisnost protoka o gustoći fluida i o površini poprečnog presjeka. Na osi apscise nalazi se protok nominalne vrijednosti, a na osi ordinate odstupanje protoka na prvom i na drugom rotametri. Dobivenim rezultatima možemo vidjeti utjecaj gustoće fluida na protok. Treba reći da do odstupanja dolazi iz razloga što su korišteni rotametri umjeravani za određeni radni tlak i za određeni fluid kako je i ranije navedeno.

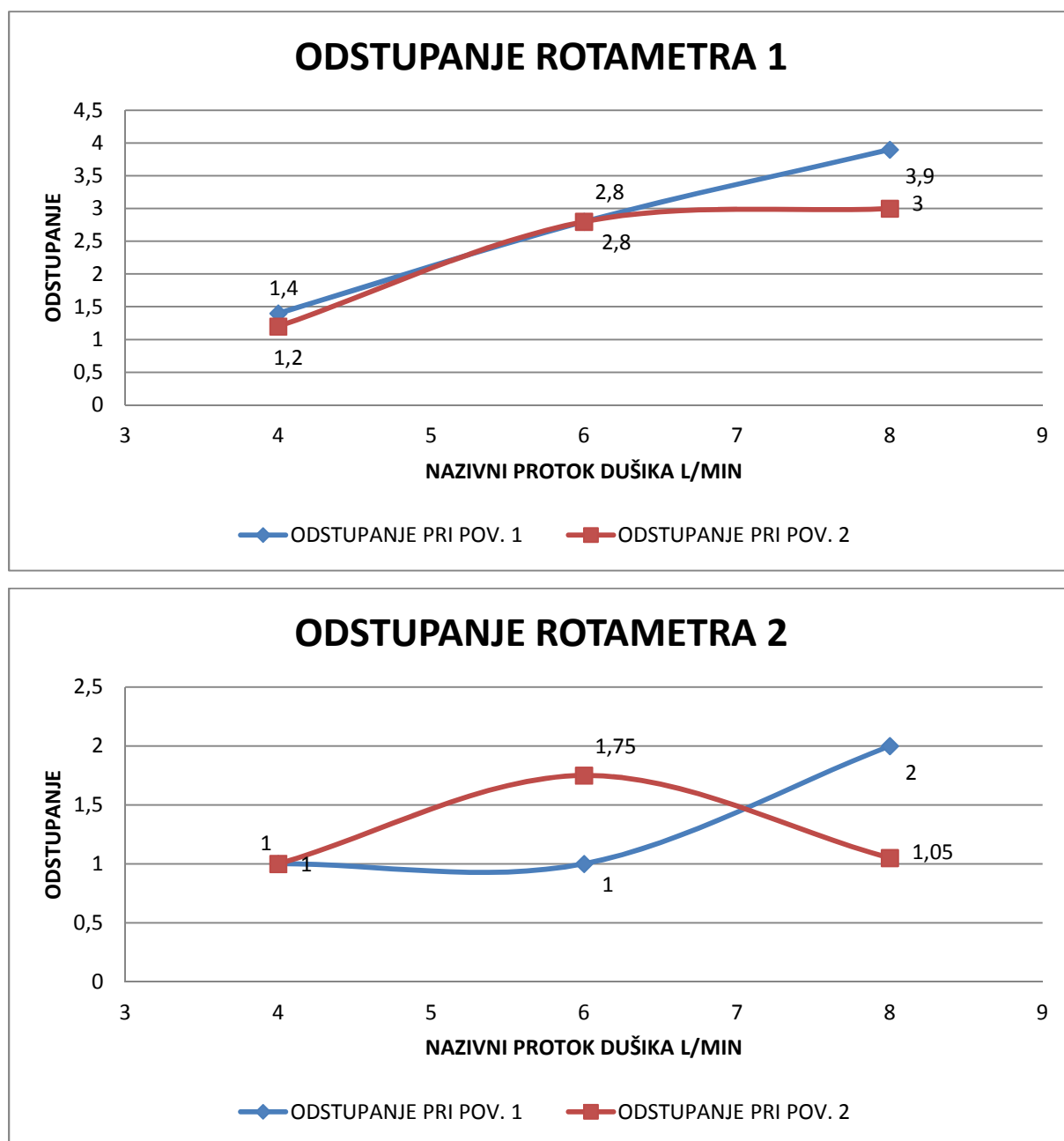


Slika 5.2. Utjecaj gustoće fluida i površine poprečnog presjeka na protok (Kisik)

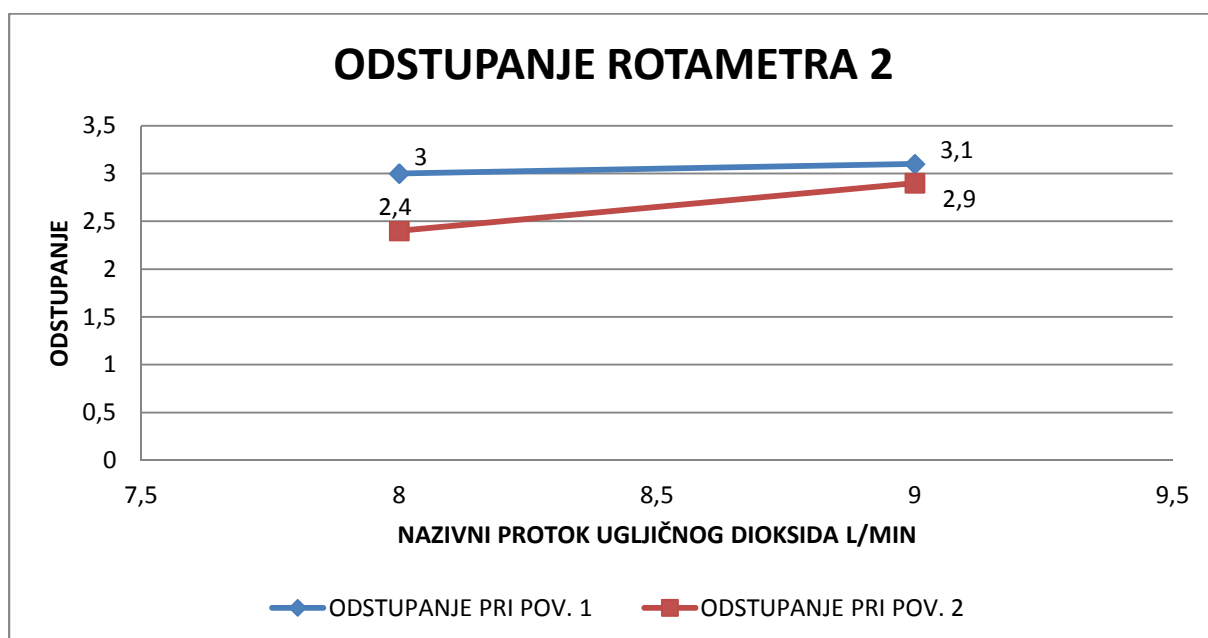
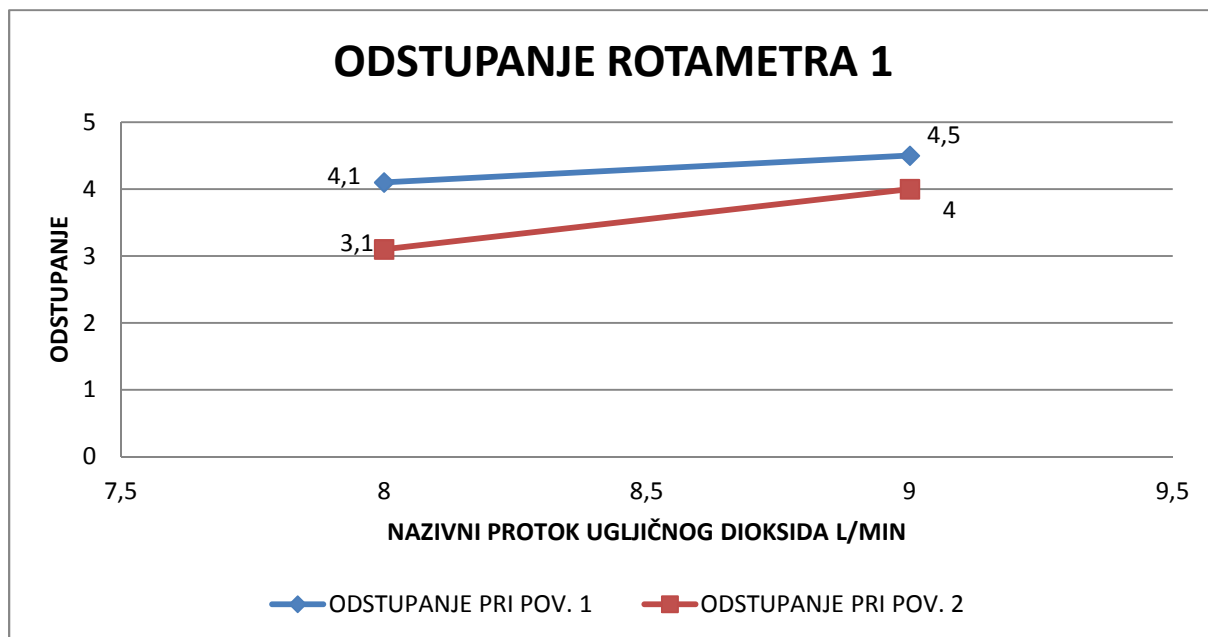


Slika 5.3. Utjecaj gustoće fluida i površine poprečnog presjeka na protok (Argon)





Slika 5.4. Utjecaj gustoće fluida i površine poprečnog presjeka na protok (Dušik)



Slika 5.5. Utjecaj gustoće fluida i površine poprečnog presjeka na protok (Ugljikov dioksid)

Prvi zaključak dobivenih rezultata vezan uz površinu porečnog presjeka je taj da se odstupanje povećava sa povećanjem poprečnog presjeka crijeva kroz koji struji fluid. Dušik je fluid koji ima najmanju gustoću od korištenih te iz dijagrama možemo vidjeti da su kod njega odstupanja najmanja. Dakle povećanjem gustoće fluida odstupanja u protoku će biti sve izraženija.

## 6. ZAKLJUČAK

Ovim završnim radom opisan je princip rada i mjerenja rotametrom i prikazan je primjer mjerenja rotametrom pri korištenju različitih fluida. Korištena su četiri različita fluida : kisik, argon, dušik i ugljični dioksid. Dan je pregled metoda mjerenja protoka, teorijske osnove svake metode i principi rade određene aparature. Također je opisan i postupak mjerenja roatametrom te metode umjeravanja koje su potrebne za daljnju uporabu samih uređaja.

Nakon teorijskog uvoda, upoznavanja sa metodama i načinima mjerenja, kao i postupku umjeravanja krenulo se sa mjerenjima u umjernom laboratoriju za tlak BMB-Brcković. Prije opisa postupka mjerenja u laboratoriju navedana je korištena oprema, korišteni fluidi, korištena metoda, kao i uvjeti u kojima su mjerenja izvršena. Mjerilo sa sa dva umjerena rotametra kroz koje su se puštali različiti fluidi pri različitim nazivnim protocima. Nakon toga, promijenili smo površinu poprečnog presjeka crijeva te su ti podaci također zabilježeni u tablicama i dijagramima. Dobivenim rezultatima mogli smo doći do zaključaka o načinu funkcioniranja rotametra određene namjene s drugim fluidima. Prikazani su utjecaji gustoće i poprečnog presjeka na rezultate i očitavanja na uređajima, te su isti pokazani na kraju rada.

Na kraju mogu reći da sam radeći ovaj rad upoznao način rada u umjernim laboratorijima, naučio metode rada i obradu mjernih rezultata. Mogu samo izraziti zadovoljstvo što sam mogao radit ovaj zanimljivi rad.

## 7. LITERATURA

1. Inženjerski priručnik ip1, Temelj inženjerskih znanja, Ivo Alfrević, Borivoj Modlić, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
2. Theory and design for mechanical measurements, Richard S. Figliola, Donald E. Beasley, USA, 1991.
3. D. Zvizdić, L. Grgec Bermanec: Predavanja iz kolegija toplinska i procesna mjerenja (mjerenja u energetici), FSB-LPM, 2009./2010.
4. V. Mudronja, B. Runje: Predavanja iz kolegija Mjeriteljstvo, Laboratorij za precizna mjerenja dužine (LFSB), 2010./2011.
5. <http://www.fer.unizg.hr/download/repository/Mjerenje-Protoka.pdf>
6. [http://www.dzm.hr/download/repository/mjerna\\_nesigurnost.pdf](http://www.dzm.hr/download/repository/mjerna_nesigurnost.pdf)
7. Krohne Messtechnik GmbH, Ingo Wald, Attila Bilgic, Duisburg, 2012.
8. [http://www.isa.org/Content/Microsites121/Standards\\_and\\_Practices\\_Department\\_Board/Home119/Ballots/RP\\_166.pdf](http://www.isa.org/Content/Microsites121/Standards_and_Practices_Department_Board/Home119/Ballots/RP_166.pdf)
9. <http://mece.utpa.edu/~tarawneh/Fluid%20Mechanics%20Lab/Handouts/Rotameter%20Calibration.pdf>